



MULTI-STEP OPTIMIZATION OF THE DIRECTLY-COUPLED PV PUMPING SYSTEMS

Zeynel Abidin FIRATOĞLU, Bülent YEŞİLATA*

Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ŞANLIURFA

Geliş/Received: 21.04.2004 Kabul/Accepted: 02.02.2005

ABSTRACT

In this study, a multi-step optimization is performed for a directly-coupled PV pumping system. The optimization analysis has four-main-steps: i) formation of longterm (16 years, between 1985-2001) meteorological database in electronic format for Sanliurfa, which is selected as the application region, ii) determination of optimum monthly panel-tilt-angle, iii) determination of optimum solar radiation intensity interval by considering operating points of the PV pumping system, iv) optimizations of PV panel-number and PV array configuration by using a highly accurate statistical method, which provides less computer time and thus less computational cost.

Following the optimization, calculated values of PV panel power-output, pump water flow-rate, and system efficiency have stayed almost constant at the desired level for most part of the day and year. These results can be considered as a success for the optimization. The method outlined in this study has also another importance in a way that it can easily be applied to any region on the earth by following a similar mathematical procedure described here.

Keywords: PV pump, Directly-coupled, Multi-step optimization.

MSC number/numarası: 49K30, 62C20, 80M50

DİREKT-AKUPLELİ FOTOVOLTAİK SU POMPASI SİSTEMLERİNİN ÇOK AŞAMALI OPTİMİZASYONU

ÖZET

Bu çalışmada direkt akupleli bir fotovoltaik su pompası için çok aşamalı bir optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon temel olarak dört aşamadan oluşmaktadır: (i) sistemin uygulanacağı yöre olarak seçilen Şanlıurfa ili için Devlet Meteoroloji İşleri Müdürlüğü'nden temin edilen 16 yıllık (1985-2001) ölçümler ile elektronik veri tabanının oluşturulması, (ii) panellerin yatay yüzeye yerleştirme açılarının optimum şekilde seçimi, (iii) fotovoltaik su pompası sistemi çalışma eğrisini göz önünde bulundurularak optimum bölgesel ışınım aralığının tespiti, (iv) bu aralığın dikkate alınarak olası panel konfigürasyonları içerisinde daha az işlem yükü ve bilgisayar zamanı gerektiren bir istatistiksel yöntem kullanılarak en iyi konfigürasyonun saptanması.

Optimizasyon işlemi sonrası yapılan hesaplamalar PV sistem güç çıkışı, pompalanan su debisi ve sistem veriminin yılın ve günün büyük bir bölümü için kararlı ve yüksek düzeyde kalarak, optimizasyon aşamalarında seçilen yaklaşımların doğruluğunu kanıtlar niteliktedir. Burada sunulan yöntemin diğer önemli bir özelliği ise, yeryüzünde herhangi bir yöreye, aynı matematiksel aşamaları izleyerek kolayca uygulanabilmesidir.

Anahtar Sözcükler: Fotovoltaik pompa, Direkt akupleli, Çok aşamalı optimizasyon

* Sorumlu Yazar/ Corresponding Author; e-posta: byesilata@harran.edu.tr, tel: (0414) 344 00 31

1. GİRİŞ

Ticari açıdan, birincil enerji kaynaklarıyla (hidrolik, fosil, nükleer vb.) henüz rekabet edebilecek düzeye erişmemesine rağmen, son yıllarda fotovoltaik enerji ile ilgili araştırmalarda, yüksek ivmeli bir artış söz konusudur. Bunun en büyük nedeni, birincil enerji kaynaklarının mevcut rezerv durumu ve enerji üretimi ile tüketimi arasındaki ilişkinin günümüzde izlediği trenddir. Bu trend fotovoltaik enerji gibi alternatif enerji kaynaklarına yönelişi kaçınılmaz kılmakta ve artık bu enerji kaynakları gelecek için stratejik bir önem arz etmektedir. Çok geniş bir uygulama sahasına sahip olan fotovoltaik enerjinin günümüzde ön plana çıkan uygulaması fotovoltaik su pompasıdır. Fotovoltaik su pompası uygulamasına yoğun talebin nedeni; elektrik şebekesinden uzak yerleşim alanlarında su temini için diğer enerji kaynaklarına nazaran fotovoltaik enerjinin daha ekonomik ve güvenilir olmasıdır. Bir diğer önemli faktör; ise su ihtiyacı ile güneş ışınım şiddeti arasında doğal bir ilişkinin bulunmasıdır.

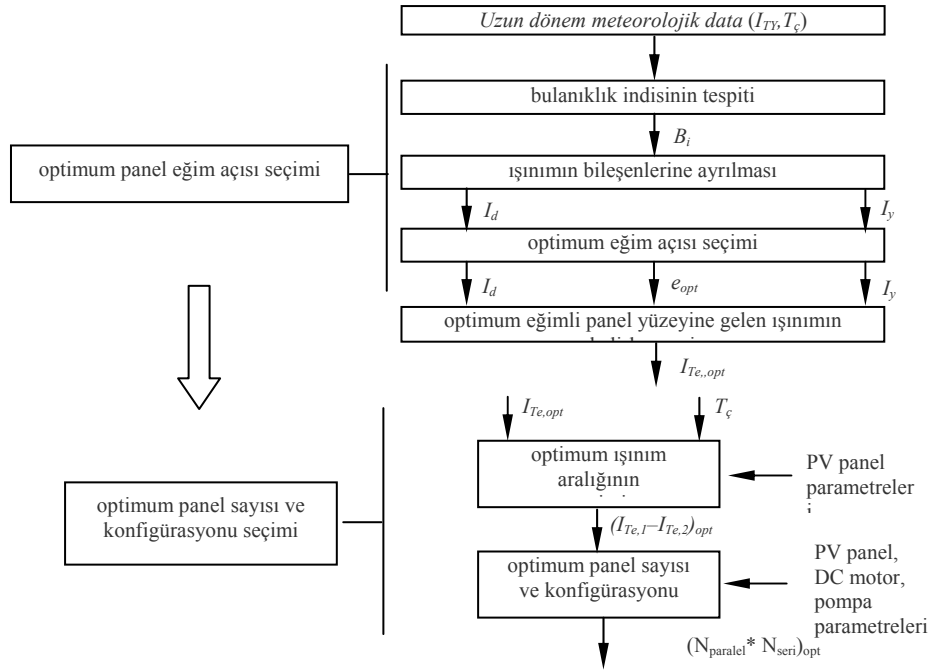
Fotovoltaik su pompalarının en basit kombinasyonları; motorun panellere hiçbir ara düzenleyici olmadan direkt bağlandığı direkt akupleli sistemlerdir. Direkt akupleli sistemlere ek olarak, PV panel ve motor arasına bataryanın yerleştirildiği bataryalı ve panellerin akım-gerilim (I-V) çıktılarını maksimum elektriksel güç teminine uygun olarak düzenleyen bir elektronik kontrol cihazının bulunduğu maksimum güç noktası izleyicili (MPPT) kombinasyonları da bulunmaktadır. Direkt akupleli fotovoltaik su pompaları çalışma verimi açısından MPPT ve bataryalı kombinasyonlara nazaran düşük bir çalışma verimine sahip olmalarına rağmen daha ekonomik ve güvenilir olduklarından yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar [1]. Direkt akupleli sistemler tasarım aşamasındayken optimum çalışma koşullarının belirlenmesi, iki aşamalı bir optimizasyon sürecinde sağlanabilir. Birinci aşama panellerin yatay yüzeye yerleştirme açılarının, ikincisi ise panel sayısı-konfigürasyonunun optimum seçimidir. Panellerin sistemin termoekonomik yapısı üzerinde direkt etkisi göz önüne alındığında yapılacak tasarımda panel sayısı-konfigürasyonunun seçiminin önemi net olarak ortaya çıkmaktadır.

Panel sayısı-konfigürasyonunun seçimi ile ilgili grafiksel ve nümerik bir çok yöntem bulunmaktadır [2,3]. Bu yöntemlerde temel amaç mevcut panel konfigürasyonu içerisinde, sistemin çalışma eğrisi ile panellerin maksimum çalışma eğrisi arasındaki alanı minimum yapacak konfigürasyonu belirlemektir [4-6]. Yöntemlerde karşılaşılan temel sorun ise sistemi oluşturan bileşenlerin matematiksel modellerinin lineer olmaması ve bu nedenle, sistemin tek bir model çerçevesinde tanımlanmasını mümkün kılmamasıdır. Sistem tümüyle bir model çerçevesinde tanımlanamadığından çok büyük bir matematiksel işlem yükü meydana gelmekte ve optimizasyonların uygulanmasında çok sayıda parametre girdisi olan bilgisayar programlarına gereksinim duyulmaktadır. Ayrıca panellerin maksimum çalışma eğrisi; düşük ışınım şiddetlerinde lineer olmayan, yüksek ışınım seviyelerinde ise yaklaşık lineer olmak üzere, iki farklı özellik gösterdiğinden, optimizasyonların bölge ışınım potansiyeline bağlı olarak dikkatle yapılması gerekmektedir [7,8].

Bu çalışmada, direkt akupleli fotovoltaik su pompalarında optimum panel sayısı-konfigürasyonunun belirlenmesinde bölgesel parametreleri göz önünde bulunduran istatistiksel bir yöntem, geliştirilmiştir. Bu yöntem, kısa bir süre önce yazarlar tarafından bir başka çalışmada [9] rapor edildiği üzere; literatürde sunulan çeşitli sayısal ve grafiksel yöntemlere kıyasla matematiksel işlem yükünün daha az olması ve kolay uygulanabilirliği gibi önemli avantajlara sahiptir. Bu çalışmada, geliştirilen metod ve uygulanma aşamaları ile ilgili açık ve detaylı bilgiler sunulduğu gibi, elde edilen sonuçların pratik uygulamalara nasıl yansımaları gerektiği konusuna da açıklık getirilmektedir. Hesaplamalar için güneş enerjisi potansiyeli açısından Türkiye'nin en zengin bölgesinde yer alan Şanlıurfa ili seçilmiştir. Bu çerçevede geliştirilen metod iki aşamayı içermekte olup algoritması Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir. Fotovoltaik sistemin çıktısının bağımsız değişkenleri olan ışınım şiddeti ve çevre sıcaklığı ile ilgili veri tabanlarının oluşturulmasında, Devlet Meteoroloji Genel Müdürlüğünden (DMİ) elde edilen 1985-2001 arası yıllara ait saatlik ortalama ölçüm verilerinden yararlanılmıştır. Optimum panel yerleştirme

Multi-Step Optimization of The Directly-Coupled...

açıların tespitinde güneşe dönük bir yüzey için optimum yıllık, aylık ve saatlik ortalama panel eğim açıları için kıyaslaması yapılmış ve optimum aylık ortalama eğim açısı ile panel yerleşiminin termoeconomik açıdan daha uygun olduğu gözlemlenmiştir. Seçilen sisteme ait optimum panel konfigürasyonu her ay için saptanmış ve bu koşullarda sistemin elektrik ve hidrolik güç çıktıları hesaplanmıştır.



Şekil 1. Geliştirilen metodun algoritmasının şematik gösterimi

2. OPTİMUM PANEL YERLEŞTİRME AÇILARININ SAPTANMASI

2.1. Veri tabanlarının oluşturulması

Şanlıurfa için veri tabanlarının oluşturulmasında DMI'den elde edilen 16 yıllık saatlik ortalama ölçümlerden yararlanılmıştır. Ham data şeklinde elde edilen saatlik ölçümler, oluşturulan bilgisayar programları yardımıyla günlük, aylık ve yıllık ortalamalara ait veri tabanları oluşturulmuştur.

2.2. Optimum panel eğim açılarının tespiti

Güneş ışınım şiddeti, güneş ışınımının yatayla yaptığı açılar, birer fonksiyonu olup, güneş enerjisinden maksimum oranda yararlanabilmek için toplayıcıların güneşi gün içerisinde iki ekseninde takip etmeleri gerekir. Bu tarz takip eden sistemlerde % 20-40 arasında değişen oranlarda daha fazla güneş enerjisi elde edilebilmesine rağmen, sistemlerin yüksek maliyetli olması ve takip için ek bir enerjiye gereksinim duyulması nedeniyle kullanımları son derece sınırlıdır. Türkiye'nin yer aldığı kuzey yarımkürede toplayıcıların güneşe dönük, sabit optimum eğim açıları yatay yüzeye yerleştirilmeleri tercih edilir [10,11]. Bu çalışmada tasarım için yıllık, aylık ve saatlik sabit optimum eğim açıları lineer tarama yöntemiyle belirlenmiştir. Optimum

eğim açılarının saptanabilmesinin ilk koşulu; eğimli yüzeylere gelen ışınım şiddetinin hesaplanabilmesidir. Meteoroloji istasyonlarında yalnızca yatay yüzeye gelen ışınım ile ilgili ölçümler yapıldığından, eğimli yüzeyler için ek hesaplamalara gereksinim duyulur. Literatürde bu amaçla geliştirilmiş bir çok model bulunmakta olup bunların ortak özelliği yatay yüzeye gelen ışınım şiddetinin birer fonksiyonu olmalarıdır. Modellerde yaşanan temel sorun ise yatay yüzeye gelen ışınım şiddetinin direkt ve yayılı olmak üzere iki bileşen içermesidir [12]. Bu bileşenler genellikle yatay yüzeye gelen toplam ışınım şiddetinin (I_{TY} (W/m^2)), atmosfer dış yatay yüzeyine gelen ışınım şiddetine (I_D (W/m^2)) oranı olarak tanımlanan bulanıklık indisi büyüklüğünün birer fonksiyonu şeklinde tanımlanmıştır.

Bu çalışmada tasarım bölgesi olarak seçilen Şanlıurfa ili için bilgisayar programları yardımıyla bulanıklık indisinin yıl ve gün boyunca dağılımına ait veri tabanı oluşturulmuştur. Yatay yüzeye gelen ışınım şiddetinin tespitinde hazırlanan veri tabanlarından yararlanılırken, atmosfer dış yatay yüzeye gelen ışınım şiddetinin hesaplanmasında;

$$I_D = I_o (\cos(\delta) \cos(L) \cos(h) + \sin(L) \sin(\delta)) \quad (1)$$

denklemleri kullanılmış olup, denklemdaki I_o parametresi atmosfer dış yüzeyine gelen ışınım şiddeti olup hesabı için literatürde çok iyi bilinen

$$I_o = I_{gs} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] \quad (2)$$

şeklindeki matematiksel bağıntıdan yararlanılmıştır [13]. Denklemlerde δ deklinasyon açısını, L enlemi, h güneş saat açısını, I_{gs} güneş sabitini ve n gün sayısını (1 Ocak'tan itibaren) göstermektedir. Güneye dönük eğimli bir yüzey üzerine gelen toplam ışınım miktarı;

$$I_{Te} = R_d I_d + R_y I_y + I_{TY} \ell \left(\frac{1 - \cos(e)}{2} \right) \quad (3)$$

bağıntısıyla tanımlanır. Denklemdaki, R_d direkt ışınım faktörünün matematiksel tanımı;

$$R_d = \frac{\cos(L - e) \cos(\delta) \cos(h) + \sin(L - e) \sin(\delta)}{\cos(L) \cos(\delta) \cos(h) + \sin(L) \sin(\delta)} \quad (4)$$

şeklinde olup, R_y ise yayılı ışınım faktörü olup bu çalışmada bu büyüklük Liu ve Jordan tarafından aşağıda önerilen bağıntıyla tanımlanmıştır [13]:

$$R_y = \frac{1 + \cos(e)}{2} \quad (5)$$

Denklem (3), (4) ve (5)'deki diğer büyüklüklerden ℓ yansıma katsayısını, e panel eğim açısını, I_d ve I_y sırasıyla yatay yüzeye gelen direkt ve yayılı ışınımı göstermektedir. Yansıyan ışınım bileşeninin, toplam ışınım içerisindeki payının küçüklüğü nedeniyle, bu bileşen literatürde birçok çalışmada olduğu gibi bu çalışmada da ihmal edilmiştir. Optimum eğim açıları; Denklem (3)'ün ekstremum noktalarının tespitiyle hesaplanabilir. Ancak bu çalışmada kapsamlı meteorolojik dataya sahip olmanın avantajı kullanılarak yeni ve etkili istatistiksel bir yaklaşımla sonuca gidilmiştir. Bu yaklaşım doğrultusunda; 0-90° eğim açıları arasında 1°'lik artırımlarda Denklem (3)'ün alabileceği değerler hesaplanmış ve bu değerler içinden lineer tarama yöntemi ile maksimum ışınım toplayan eğim açıları belirlenmiştir. Bunun için ilk aşamada gerekli olan yatay yüzeye gelen ışınımın direkt ve yayılı bileşenleri değerlerinin hesabında, bulanıklık indisinin bir fonksiyonu olarak verilen

$$\frac{\bar{I}_y}{\bar{I}_T} = 1 - 1.112 \bar{B}_i \quad (6)$$

bağıntısından aylık-ortalama günlük yayılı ışınım bileşeni tespit edilmiş ve

Multi-Step Optimization of The Directly-Coupled...

$$\frac{I_y}{\bar{I}_y} = \left(\frac{\pi}{24} \right) \frac{\cos(h) - \cos(h_s)}{\sin(h_s) - (2\pi h_s / 360) \cos(h_s)} \quad (7)$$

denklemleri vasıtasıyla da saatlik-ortalama değerler hesaplanabilmektedir. Yatay yüzeye gelen direkt ışınım bileşeninin saatlik-ortalama değeri ise toplam ışınım ile yayılı bileşen değerleri arasındaki fark alınarak kolayca belirlenebilmektedir.

PV panellerin hangi eğim açılarında yerleştirilmesi gerektiği konusunda üç farklı alternatif değerlendirilmiştir; i) tek eksenli güneş takip sistemi kullanarak optimum saatlik-ortalama eğim açısının ($e_{opt(s)}$) izlenmesi, ii) basit bir mekanik sistemle optimum aylık-ortalama eğim açısının ($e_{opt(a)}$) izlenmesi, iii) sabit konumda yıllık optimum eğim açısı ($e_{op(y)}$, Şanlıurfa için 37°) ile yerleştirilmesi. Bu üç farklı durum için bilgisayar programı yardımıyla bu açılarda panel yüzeyine gelen günlük toplam ışınım değerleri hesaplanmış ve yıl boyunca dağılımı Şekil 2'de gösterilmiştir.

Şekil 2'deki diyagramdan görüleceği üzere göz önüne alınan bu üç farklı dizayn arasında kış ayları için belirgin bir fark olmamasına karşın, yaz aylarında bu durum değişmektedir. Panel yüzeyi üzerine gelen günlük toplam ışınım şiddeti açısından en uygun yerleştirme şekli, beklenene göre optimum saatlik ortalama eğim açısında yerleşimdir. Ancak, optimum aylık ortalama eğim açılı yerleştirme seçeneğinin kolay ve ekonomik uygulanabilirliği yanında, panel yüzeyine gelen toplam ışınım değerleri açısından da saatlik izleme seçeneği ile arasındaki farkın az olması nedeniyle bu uygulamanın daha uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Panellerin yıllık optimum eğim açılarında sabit olarak yerleştirilmesi doğal olarak en kolay uygulanabilir tercih olmasına karşın, 4-10 ayları arasında ciddi seviyede kayıplar söz konusu olduğundan bu seçeneğin uygun olmayacağı yine Şekil 2'den net olarak gözükmektedir. Bu nedenle bu çalışmanın ileriki kısımlarında yapılan analizlerde panel eğim açısı olarak optimum aylık ortalama eğim açısı değerleri kullanılmıştır.

3. PANEL SAYISI-KONFİGÜRASYONU OPTİMİZASYONU

3.1. Sistem Seçimi ve Elemanların Matematiksel Modelleri

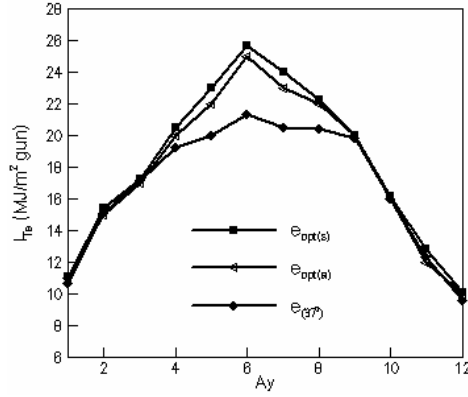
Sistem olarak fotovoltaik su pompalarının direkt akupleli kombinasyonları seçilmiş olup seçilen panel, motor ve pompa ilgili teknik özellikler Ek 1'de verilmiştir.

PV Panel

Sistemin uzun dönem enerji analizinin yapılabilmesi için ışınım şiddetinin ve çevre sıcaklığının bir fonksiyonu olan panel karakteristiklerinin matematiksel modellerle tanımlanması gerekir. Bu çalışmada ticari alanda %60 pazar payına sahip kristal silikon (C-Si) paneller seçilmiştir. Literatürde kristal silikon hücre ile ilgili geliştirilmiş bir çok model bulunmaktadır. Bu çalışmada panel karakteristiklerin tanımlanmasında, $R_{sh} \gg R_s$ varsayımıyla elde edilen aşağıdaki matematiksel model kullanılmıştır [15,16].

$$I = I_L - I_{kr} \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{A}\right) - 1 \right] \quad (8)$$

Denklemlerdeki I_L yüzeye ışınım düştüğünde üretilen akımı, I_{kr} karanlık devre akımı, R_s seri direnci, A termal voltajı, I ve V sırasıyla çalışma akımını ve voltajını göstermektedir. Bu modelin en büyük özelliği, beş olan parametre sayısının dörde düşürülmesi sonucu üretici firma katalog verileriyle çözüm yapılabilmesidir. Denklem (8) kullanılarak PV panel olarak seçilen AP50 PV panelin farklı ışınım şiddetlerinde direnç güç karakteristikleri hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Güneye dönük saatlik-ortalama, aylık-ortalama ve yıllık-ortalama eğim açılı yüzeyler üzerine gelen günlük toplam ışınım miktarının aylara göre değişimi

DC-Motor

DC motorlar uyarılma alanlarına göre; kendinden uyarılı, seri, şönt ve kompunt olmak üzere dört tipte sınıflandırılırlar. Tüm DC motorlar için genel gerilim ve moment (tork) bağıntıları:

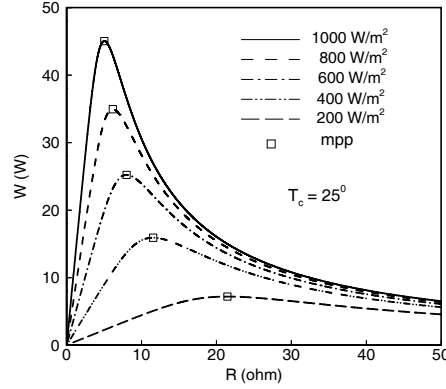
$$V_m = E + V_a = K_v \omega + I_a R_a \quad (9)$$

$$M_m = P_m / \omega = K_M I_a \quad (10)$$

$$\eta_m = P_m / P_{pv} = (M_m \omega / VI) \quad (11)$$

şeklinde tanımlanmaktadır [17]. Denklemlerde; V_m motora uygulanan gerilimi, E motor gerilim sabitini, I_a motor armatür akımını, R_a motor armatür direncini, K_v elektro-motor kuvvet sabitini, ω motor şaftının açısal hızını, P_m motor şaft gücünü, P_{pv} PV panellerin çıkış gücünü, M_m motor elektromanyetik torkunu, K_M tork sabitini, η_m motor verimini göstermektedir. Motor için matematiksel model geliştirmenin amacı; motora uygulanan gerilim ile motorun dönme hızı arasındaki ilişkiyi saptamaktır. Böylece motorun sistem içindeki performansını ölçmek amacıyla motora giren elektriksel güç ile motordan elde edilebilecek mekaniksel güç arasında bir bağıntı elde edilebilir.

Bu çalışmada motor olarak, fotovoltaik su pompalarında sürücü olarak yaygın bir şekilde kullanılan kendinden uyarılı DC motor seçilmiştir. Kendinden uyarılı DC motorlarda; diğer tip DC motorların aksine, manyetik alan statore yerleştirilen elektrik sargıları üzerinden akım geçilerek değil, mıknatıslar vasıtasıyla üretilir. Ayrıca akım değişimini sağlayan fırçalar yerine elektronik bir cihaz kullanılır. Böylece statordeki sarımlardan geçen akım ve fırçalar dolayısıyla meydana gelen kayıplar önlenmiş olur. Bu motorlarda stator ve rotorun üstlendikleri işlevler diğer DC motorların tam tersidir. Uyarılma işlevini rotordaki mıknatıslar yaparken motor sargıları statore yerleştirilmiştir. Kendinden uyarılı DC motorların bu avantajlarına karşın; fazlasıyla karmaşık yapıları nedeniyle, kırsal yörelerdeki kullanıcılar açısından teknik bakım zorluğuna sebep olacağı yönünde, özellikle son yıllarda gündeme gelen bazı uyarılar söz konusudur [18, 19].



Şekil 3. AP50 PV panelin farklı ışınım şiddetlerinde güç-direnç karakteristikleri (mpp: maksimum güç noktası)

Pompa

PV sistemlerin su pompası uygulamasında en çok kullanılan pompa tipi santrifüj prensibine göre çalışan pompalardır [20, 21]. Bunun en büyük nedeni; bu tip pompaların PV kaynaklı güce uyumlu yük profiline sahip olmalarıdır [22]. Ayrıca diğer pompalara göre daha basit bir yapıya sahip olması, ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin düşük olması ve tasarım açısından geniş seçenek sunmaları diğer önemli avantajlarıdır. Bu çalışmada da pompa olarak santrifüj pompa seçilmiştir. Bu tip pompalarda, enerji dönüşümü pompa çarkı üzerindeki kanatçıklar boyunca gerçekleşir. Su pompa eksenine paralel V_1 hızıyla pompaya girip, pompayı radyal veya yine eksensel yönde V_2 hızıyla terk eder. Daimi akış da pompa giriş ve çıkış arasında yazılan enerji denklemi kullanılırsa, pompa giriş ve çıkışı arasında oluşan basınç farkı

$$\Delta P = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \rho + \rho g h_m \quad (12)$$

şekindedir. Oluşan bu basınç farkı sonucunda, su daha yüksek kotlara pompalanır. Denklemdaki ρ yoğunluğu ve h_m manometrik pompa yüksekliğini göstermektedir. Pompa torku ve debi arasındaki ilişki belli sınır şartları altında pompa boyutlarının bir fonksiyonu olarak,

$$M_p = Q \rho \left[R_2 \left(\omega R_2 + \frac{Q \cot \beta_2}{2 \pi R_2 b_2} \right) - R_1 \left(\omega R_1 + \frac{Q \cot \beta_1}{2 \pi R_1 b_1} \right) \right] \quad (13)$$

şeklinde tanımlanır [22]. Denklemdaki Q debiyi, R_1 çarkın giriş çapını, R_2 çarkın çıkış çapını, b_1 kanatçığın giriş yüksekliğini, b_2 pompa kanatçığının çıkış yüksekliğini, β_1 kanatçık giriş açısını ve β_2 kanatçık çıkış yüksekliğini göstermektedir. Pompaların birçoğunda olduğu gibi suyun düşey doğrultuda hareket ettiği varsayılırsa, debi:

$$Q = \omega R_1^2 2 \pi b_1 \tan \beta_1 \quad (14)$$

ile ifade edilir [22]. Denklem (13) ve (14) birleştirilirse; pompanın açısal hızının ve boyutlarının bir fonksiyonu olarak tork denklemi,

$$M_p = \rho \omega^2 R_1^2 2 \pi b_1 \tan \beta_1 \left(R_2^2 + \frac{R_1^2 b_1 \tan \beta_1}{b_2 \tan \beta_2} \right) \quad (15)$$

şeklinde elde edilir. Pompanın boyutlarına ilişkin katsayı,

$$K_p = \rho R_1^2 2\pi b_1 \tan \beta_1 \left(R_2^2 + \frac{R_1^2 b_1 \tan \beta_1}{b_2 \tan \beta_2} \right) \quad (16)$$

ile tanımlanırsa, pompa torku ile pompanın açısal hızı arasındaki ilişki,

$$M_p = \omega^2 K_p \quad (17)$$

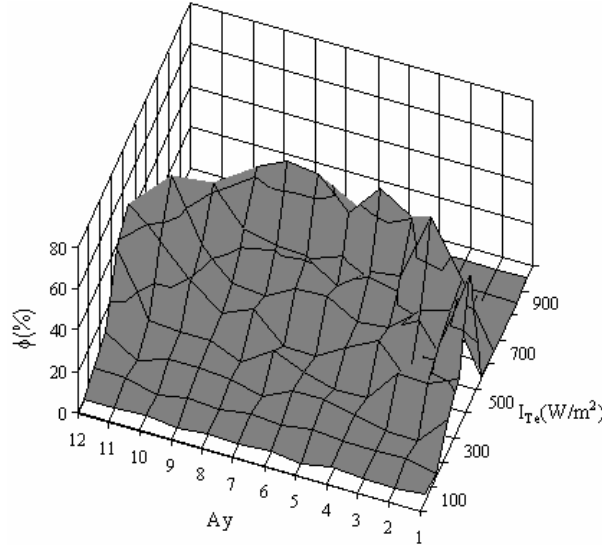
olarak elde edilir. (10), (11) ve (17) nolu doğrusal olmayan denklemler artık PV pompa sisteminin hesabı için gerekli üç bilinmeyen parametrenin (I , V ve ω) bulunması için yeterli olup, bu denklemler ve sistem bileşenlerinin teknik katalog bilgilerinden pompanın çalışma eğrisi ve güneş ışınım şiddeti arasındaki ilişki saptanabilir.

3.2. Optimum Işınım Aralığının Tespiti

Daha önceki bölümlerde sunulan yöntem ve veri tabanları yardımıyla, güneye dönük optimum aylık ortalama eğim açıları bir AP50 PV panelin, aylık ortalama kullanılabilirliğinin ışınım seviyelerine dağılımı hesaplanmıştır. Kullanılabilirlik (ϕ), panelin maksimum çalışma eğrisi boyunca saatlik ortalama ışınım seviyelerindeki panel gücünün, aynı eğri boyunca elde edilebilecek günlük toplam panel gücüne oranı olarak tanımlanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen sistem kullanılabilirliğinin yıl boyunca değişimi Şekil 4'da gösterilmiştir. Hesaplanan bu verilerden yararlanılarak, en fazla kullanılabilirliğin elde edildiği optimum ışınım aralıkları her ay için saptanmış ve Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. AP50 PV panelin kullanılabilirlik (ϕ) kriteri doğrultusunda saptanan optimum ışınım aralıklarının aylara göre değişimi.

Ay	1	2	3	4	8	6
$I_{Te,1} - I_{Te,2}$	300-400	400-700	500-700	500-800	600-800	500-900
Ay	7	8	9	10	11	12
$I_{Te,1} - I_{Te,2}$	500-800	600-800	500-800	400-700	400-600	300-500



Şekil 4. Güneye dönük optimum aylık-ortalama eğim açılı AP50 PV panel kullanılabilirliğinin (ϕ) ışınım seviyelerine göre dağılımı

3.3. Panel sayısı-Konfigürasyonu Seçimi

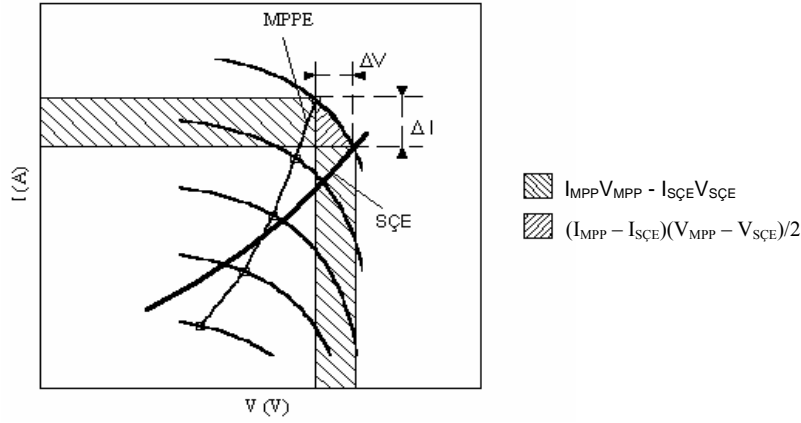
Bu çalışmada Şekil 3'de gösterilmiş olan panel karakteristikleri üzerindeki maksimum çalışma noktalarından geçecek eğriyi tümüyle göz önünde bulundurmak yerine; bölgesel parametrelere bağlı olarak, eğrinin optimum ışınım aralığına karşılık gelen kısmı göz önünde bulundurulmuş ve optimum panel sayısı ve konfigürasyonu bu doğrultuda belirlenmiştir. Tablo 1'de verilmiş olan değerlerden de anlaşılacağı üzere sistem kullanılabilirliği belli bir ışınım şiddeti aralığında yoğunlaşmakta olup, bu aralıkta sistem kullanılabilirliğinin %70-90 arasında değişen kısmına ulaşmak mümkündür. Bu nedenle tasarımda söz konusu bu optimum ışınım aralıkları yerine eğri tümüyle ele alınırsa, sistem performansı maksimum kullanılabilirlik düzeyinin altında kalabileceği gibi, optimizasyon algoritması da daha kompleks olacak ve dolayısıyla matematiksel işlem yükü ciddi seviyede artacaktır.

Bu çalışmada uygulanan optimizasyon için Tablo 1'de verilen ışınım aralıkları göz önünde bulundurularak, yılın her ayı için en uygun panel sayısı-konfigürasyonu seçimi 48, 50, 54, 60 ve 64 adet panelin mümkün olan 43 konfigürasyonu arasından istatistiksel yöntemlerle yapılmıştır. Uygulanan istatistiksel yöntemde amaç: sistemin çalışma eğrisi ile panellerin maksimum çalışma eğrisi arasındaki farkı sözü edilen ışınım aralığında minimum yapmaktır. Bu kriterin matematiksel ifadesi; Şekil 5'de gösterildiği gibi maksimum çalışma eğrisi ve sistemin çalışma eğrisi arasında mevcut olan üçgenlerin alanlarının toplamını, her ay için Tablo 1'de belirlenen ışınım aralığında, minimumda tutacak panel konfigürasyonunun saptanması şeklindedir. Şekil 5'de görüldüğü gibi, iki eğri arasındaki üçgenin alanı; maksimum çalışma eğrisinin sistemin çalışma eğrisine göre I ve V ekseninde meydana gelen mutlak hataların çarpımlarının birer fonksiyonu olması nedeniyle,

$$\sigma = \left[\frac{\sum (I_{SCE} - I_{MPP})^2 * (V_{SCE} - V_{MPP})^2 / G_{PV}^2}{m} \right]^{1/2} \quad (18)$$

şeklinde bir istatistiksel parametre tanımlamak mümkündür. Bu denklemin en önemli özelliği matematiksel işlem yükü çok fazla ve dolayısıyla hata yapma olasılığı büyük olan grafiksel ve nümerik metotlar yerine, işlem yükü ve uygulanabilirlik açısından daha avantajlı bir istatistiksel işlem ile panel konfigürasyonu seçimi yapılabilmesidir [9]. Denklemdaki m hesaplamanın yapıldığı ışınım aralığındaki adım sayısını, G_{PV} panel yüzeyine ulaşan ışınım gücünü (W) göstermektedir. Denklem (18)'de tanımlanan parametre, 43 konfigürasyon için geliştirilen bir bilgisayar programı yardımıyla 10 W artırımlarla hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda seçilen sistem için yıllık çalışma koşulu altında aylık ortalama bazda, optimum panel konfigürasyonları, 10*5 12*4 ve 12*5 (paralel*seri(p*s)) olmak üzere üç farklı kombinasyon saptanmıştır. Bu konfigürasyonların aylara göre dağılımları Tablo 2'de verilmiştir. Söz konusu bu üç farklı konfigürasyon için, maksimum çalışma noktası eğrisi ile sistemin çalışma eğrisini de içeren I-V diyagramları Şekil 6'de gösterilmiştir. Hazırlanan bu diyagramlardan, optimizasyonun yapıldığı ışınım aralığında sistemin çalışma eğrisinin maksimum güç noktalarına yakınlığı optimizasyon için uygulanan metodun başarı düzeyini kanıtlayan önemli bir göstergedir.

Denklem (18) vasıtasıyla gerçekleştirilen optimizasyonun, maksimum güç ile çalışma gücü arasındaki farkı minimum yapacak bir yaklaşımla da gerçekleştirilmesi mümkündür. Ancak Şekil 5'de gösterilen geometrik analizden de anlaşılacağı üzere, $(I_{MPP} - I_{SCE})(V_{MPP} - V_{SCE})$ terimi yerine, daha büyük sayısal değerlerle sonuçlanan $(I_{MPP}V_{MPP} - I_{MPP}V_{SCE})$ terimini kullanmak gerekecektir. Algoritma oluşturma sırasındaki gözlemlerimiz; aynı hassasiyette çözüm için, daha fazla işlem yükü ve işlem zamanı gerektiğini göstermektedir.



Şekil 5. Panel konfigürasyonu seçimi için uygulanan matematiksel yaklaşımın grafiksel gösterimi

3.4. Pompalanan Su Debisi ve Sistem Verimi

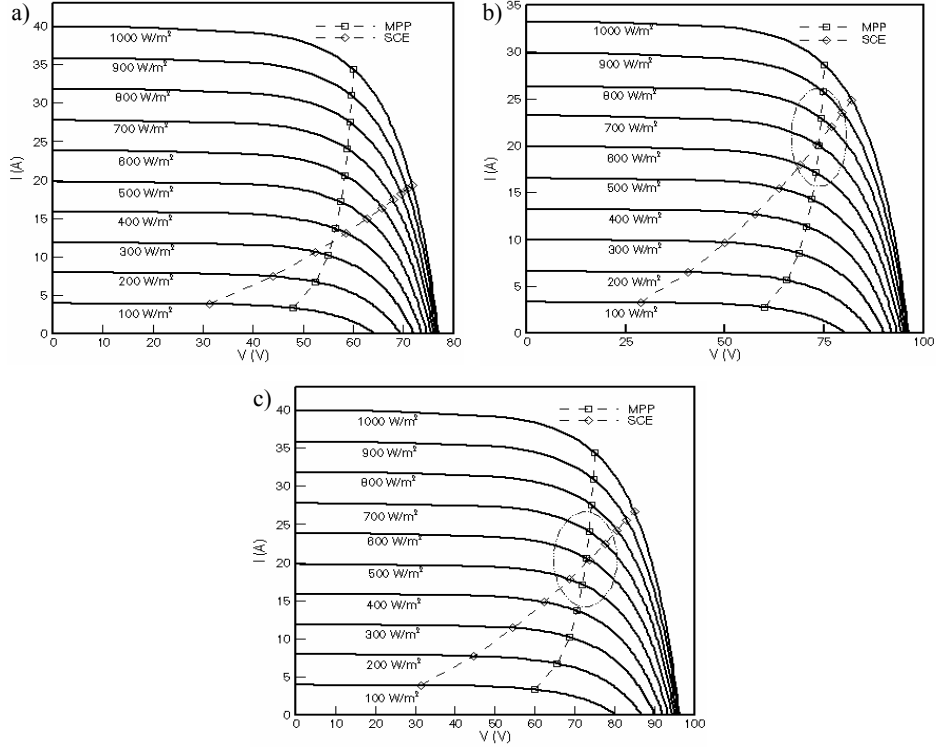
Geliştirilen optimizasyon algoritması çerçevesinde her ay için saptanan optimum panel yerleştirme açıları ve panel sayısı-konfigürasyonu koşullarında sistemden pompalanacak su debisi ve sistem verimi değerleri hesaplanmıştır. PV destekli su pompalama sistemleri için hesaplanması gereken ve temel hedef fonksiyonu olan su debisinin, toplam pompa yükünün birim değeri için (1 bar \cong 10 mSS) elde edilen değerlerinin yıl boyunca değişimi Şekil 7’de gösterilmiştir. Toplam pompa yükü; dinamik ve statik yüklerin her ikisini de içermekle birlikte, bu tür sistemlerde dinamik yük etkisi genellikle büyük çaplı boru kullanarak minimuma indirildiğinden, yükün tamamına yakını kot farkından doğan statik yükü temsil etmektedir. Şekil 7’den görüleceği üzere, sistem; yılın bazı aylarında panel sayısındaki farklılıkların sebep olduğu küçük dalgalanmalar dışında, yılın büyük bir bölümü ile gün içerisinde güneşin etkin olduğu saatler (8:00-15:00) arasında, kesintisiz ve kararlı şartlara yakın bir çalışma prensibi sergilemektedir.

Sistemin bu çarpıcı özelliğini daha net sergilemek amacıyla, optimize edilmiş sistem veriminin, maksimum çalışma noktalarında çalıştığı varsayılan ideal bir sistem verimine oranını gösteren grafik Şekil 8’de sunulmuştur. Yılın çok büyük bir bölümünde bu oran yüzde seksenin üzerine çıkmakta ve günün büyük bir bölümünde ise bu yüksek düzeyde sabit kalmaktadır. Optimizasyonun temel amacı sistemi maksimum çalışma noktalarına yakın çalıştırmak olduğundan Şekil 8 bu çalışmada geliştirilen metot ve yaklaşımların doğruluğunu net olarak kanıtlar niteliktedir.

Tablo 2. Seçilen sistem için saptanan optimum panel konfigürasyonlarının aylara göre dağılımı

Ay	1	2	3	4	8	6
$(p*s)_{opt}$	12*4	10*5	12*5	10*5	10*5	10*5
Ay	7	8	9	10	11	12
$(p*s)_{opt}$	10*5	10*5	10*5	10*5	12*5	12*4

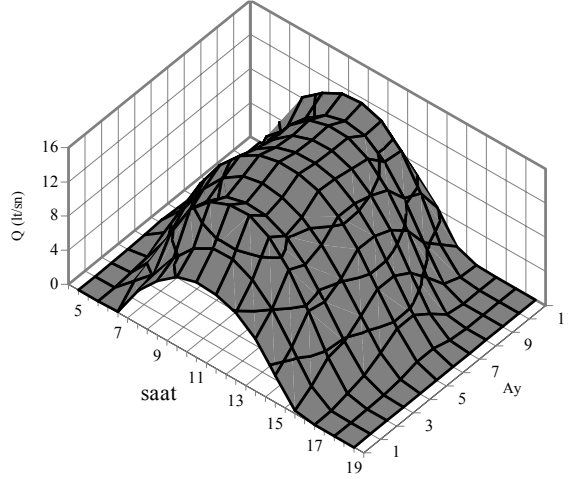
Multi-Step Optimization of The Directly-Coupled...



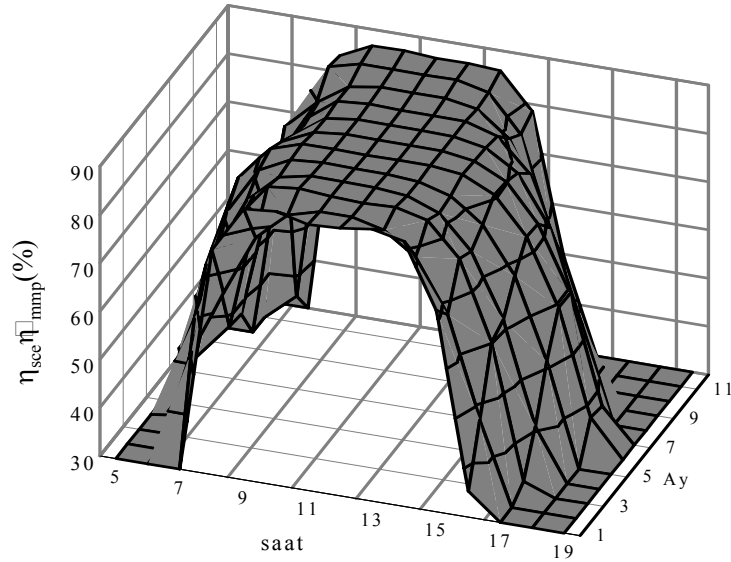
Şekil 6. (a) 12*4, (b) 10*5, (c) 12*5 (p*s) panel konfigürasyonlarının I-V karakteristik eğrileri (MPPE: maksimum çalışma eğrisi, SCE: sistemin çalışma eğrisi)

4. Bulgu ve Katkıların Değerlendirilmesi

Bu çalışmada direkt akupleli PV panel – pompa sisteminin en uygun koşullarda çalışmasını sağlamak için çok aşamalı bir optimizasyon metodu geliştirilmiştir. Çözüm algoritması basit, hızlı ve nümerik olarak kararlı bir özellik taşımaktadır. Literatürde uygulanan çözüm tekniklerine ek olarak bu çalışmada üç yeni temel yaklaşımla sonuca ulaşılmıştır. Bu yaklaşımların mantığında tasarım yapılacak yöre meteorolojik parametrelerinin kapsamlı analizi yatmakta olup, söz konusu yaklaşımlar sırasıyla; optimum aylık ortalama panel eğim açısı kullanımı, optimum



Şekil 7. Pompalanan su debisinin saat ve aylara göre değişimi



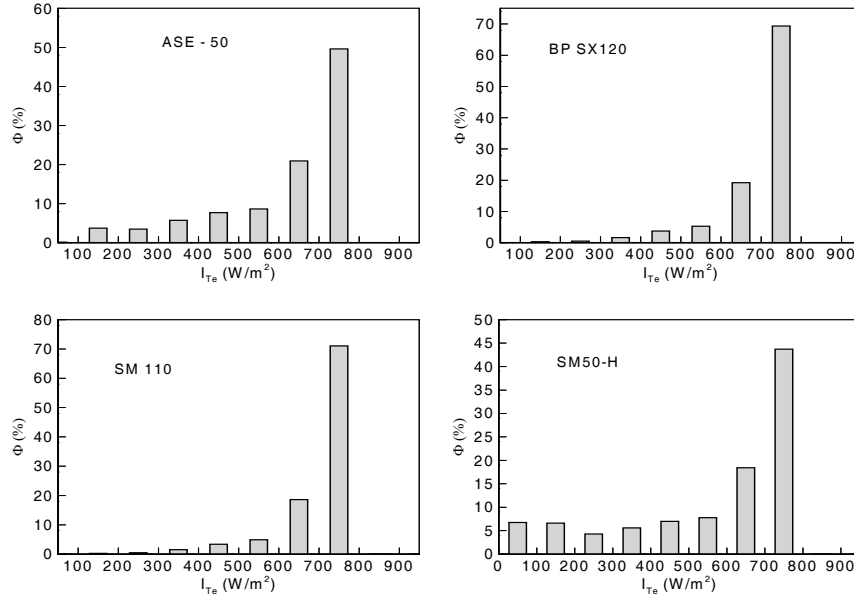
Şekil 8. Seçilen sistem veriminin hesaplamalarda kullanılan panelin maksimum çalışma noktalarındaki (MPP) verimine oranının saat ve aylara göre değişimi

ışınım aralığı seçimi ve en iyi panel sayısı-konfigürasyonunun belirlenmesi için istatistiksel bir parametre ile kullanımıdır. Sonuçlar bu yaklaşımların doğruluğunu net bir şekilde kanıtlar niteliktedir. Burada sunulan yöntemin en önemli özelliği, PV-pompa sistemi bileşenlerine ait imalatçı firma katalogunda verilen teknik özelliklerin çözüme ulaşmak için yeterli olması ve ek deneysel dataya ihtiyaç bulunmamasıdır. Tanıtılan metot her yöreye ve her türlü PV panel-motor-pompa tipine benzer aşamalar takip edilerek uygulanabilir. Bu açıklamaya örnek olması amacıyla, bu çalışmada optimum ışınım aralığını belirlenmesinde uygulanan kullanılabilirlik yönteminin

Multi-Step Optimization of The Directly-Coupled...

kriteri olan ışınım yoğunluklarının farklı panel tipleri için değişimi Şekil 9’de (Mayıs ayı için) gösterilmektedir. Şekil 9’deki histogramdan görüleceği gibi söz konusu ay için saptanan optimizasyon aralığı 600-800 W/m² ışınım aralığında, dört panelin kullanılabilirlikleri birbirlerine yakın düzeyde olup, aradaki küçük farklar panellerin teknik özelliklerinin birbirlerinden oldukça farklı olmasından kaynaklanmakta, fakat bu derece küçük farklar çözüm aşamasına etki etmemektedir.

PV panellerin her ay farklı eğim açılarında yerleştirilmeleri çok basit ve ekonomik bir mekanik sistem ile sağlanabileceğinden uygulanabilirliği açısından ciddi bir sorun söz konusu değildir. Panel elektriksel konfigürasyonunun (yıllık kullanım söz konusu ise) sadece basit bir elektriksel işlem ile dönüşümü sağlanabileceği gibi, yılın kış ayları hariç diğer ayları için optimum konfigürasyon olan 10p*5s konfigürasyonunun tüm yıl için seçimi de mümkündür. Bu konuda kazanç-kayıp dengesi kullanıcı şartları içerisinde değerlendirilmesi gereken bir konudur.



Şekil 9. ASE 50, BP SX120, Siemens SM 110 ve Siemens SM50-H PV panellerin Şanlıurfa ili için Mayıs ayında aylık ortalama günlük kullanılabilirliğinin ışınım seviyelerine dağılımı

TEŞEKKÜR

Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Komisyonu tarafından verilen destek (HÜBAK Proje No: 440) bu çalışmanın tamamlanmasında önemli rol oynamıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Konner, P. K., "Optimization Techniques for a Photovoltaic Water Pumping System", Renewable Energy, 6, 53-62, 1995.
- [2] Appelbaum, J., Bany, J., "Performance Analysis of D.C. Motor Photovoltaic Converter System-I", Solar Energy, 22, 439-445, 1978.

- [3] Appelbaum, J., "Performance Analysis of DC Motor-Photovoltaic Converter System-II", *Solar Energy*, 27, 421-431, 1981.
- [4] Fıratoglu Z. A., Yeşilata B., "Fotovoltaik Güç Destekli Dalgıç Pompa Sistemlerinde Optimum Dizayn Koşullarının Araştırılması", *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, Nisan-Mart Sayısı, 59-66, 2001.
- [5] Hsiao, Y. R., "Direct Coupling of Photovoltaic Power Source to Water Pumping System", *Solar Energy*, 32, 489-498, 1984.
- [6] Suehrcke, H., Appelbaum, J., Reshef, B., "Modeling a Permanent Magnet DC Motor/Centrifugal Pump Assembly in a Photovoltaic Energy System", *Solar Energy*, 59, 37-42, 1997.
- [7] Fıratoglu, Z. A., Yeşilata, B., "Bataryalı ve Direkt Akupleli Fotovoltaik Pompa Sistemlerinin Çalışma Karakteristiklerinin Araştırılması", *Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi*, 8-18, Haziran 2003 .
- [8] Fıratoglu Z. A., Yeşilata B., "Lineer Elektriksel Yüke Bağlı PV Panellerin Optimizasyonu ve Bölgesel Uygulanabilirliğinin Araştırılması", *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 1, 64-72, Ocak 2003 .
- [9] Fıratoglu Z. A., Yeşilata B., "New Approaches on the Optimization of Directly Coupled PV Pumping Systems", *Solar Energy*, 77, 81-93, 2004.
- [10] Bloos, H., "Analytical and Experimental Investigation of Photovoltaic Pumping Systems", Ph.D. Thesis, University of Oldenburg, 2000.
- [11] Fıratoglu Z. A., Yeşilata B., "Fotovoltaik Destekli Su Pompası Uygulamasının Dinamik Analizi", II Gap ve Sanayi Kongresi, Sayfa 541-549, 29-30 Eylül, 2001, Diyarbakır.
- [12] Hay, J. E., "Calculation of Monthly Mean Solar Radiation for Horizontal and Inclined Surfaces", *Solar Energy*, 23, 301-307, 1979.
- [13] Klein, S. A., "Calculation of Monthly Average Insulation on Tilted Surfaces", *Solar Energy*, 19, 325-329, 1977.
- [14] Dinçer, I., "Optimum Tilt Angle for Solar Collectors Used in Cyprus", *Renewable Energy*, 6, 813-819, 1995.
- [15] Kou S.A., Klein A., Beckman W., " A Method for Estimating the Long-Term Performance of Direct Coupled PV Pumping Systems", *Solar Energy*, 64, 33-39, 1998.
- [16] M. Al-İbrahim, Beckman, W. A., Klein, S. A., Mitchell J. W., "Design Procedure for Selection an Optimum Photovoltaic Pumping System in a Solar Domestic Hot Water System", *Solar Energy*, 64, 227-239, 1998.
- [17] Mummedi, V. C., "Steady-State and Dynamic Performance Analysis of PV Supplied DC Motors Fed from Intermediate Power Converter", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 61, 365-381, 2000.
- [18] Short, T.D., Oldach, R., "Solar Powered Water Pumps: The Past, the Present-and the Future? " *Solar Energy Engineering*, 125, 76-82, 2003.
- [19] Short, T.D. Thompson, P., "Breaking the Mould: Solar Water Pumping-the Challenges and the Reality", *Solar Energy*, 75, 1-9, 2003.
- [20] Anis, W. R. and Metwally, H. M. B., "Dynamic Performance of a Directly Coupled PV Pumping System", *Solar Energy*, 53, 369-377, 1994.
- [21] Suehrcke, H., Appelbaum, J., Reshef, B., "Modeling a Permanent Magnet DC Motor/Centrifugal Pump Assembly in a Photovoltaic Energy System", *Solar Energy*, 59, 37-42, 1997.
- [22] Braunstein A., Kornfeld A., "Analysis of Solar Powered Electric Water Pumps", *Solar Energy*, 27, 235-240, 1981.

Semboller Listesi

δ : Deklinasyon açısı ($^{\circ}$)	I_L : Yüzeğe ışınım düştüğünde üretilen akımı
ω : Açısal hız (rad/s)	I_o : Atmosfer dışına gelen ışınım (W/m^2 gün)
ρ : Yoğunluğu (kg/m^3)	I_{TY} : Yatay yüzeğe gelen ışınım (W/m^2 gün)
β_1 : Kanatçık giriş açısı ($^{\circ}$)	I_y : Yayılı ışınım bileşeni (W/m^2 gün)
β_2 : Kanatçık çıkış açısı ($^{\circ}$)	K : Motor tork sabiti (Vs)
η_m : Motor verimi	K_p : Pompa sabiti (Js)
A : Termal voltaj (V)	K_v : Elektro-motor kuvvet sabiti (V/rad/s)
b_1 : Kanatçığın giriş yüksekliğini (m)	L : Enlem
b_2 : Kanatçığın çıkış yüksekliğini (m)	M : Motor elektromanyetik torku (M_m)
B_i : Bulanıklık indisi	M : Pompa torku (M_p)
e : Panel eğim açısı ($^{\circ}$)	P_m : Motor shaft gücü (W)
E : Motor gerilim sabiti (V)	P_p : PV panelin çıkış gücü (W)
h : Güneş saat açısı ($^{\circ}$)	Q : Debi (kg/s)
h_m : Toplam pompa yükü (m)	R_1 : Çarkın giriş çapı (m)
h_s : Güneş batış açısı ($^{\circ}$)	R_2 : Çarkın çıkış çapı (m)
I : Akım (A)	R_a : Motor armatür direnci (Ω)
I_a : Motor armatür akımı (A)	R_s : Seri direnç (Ω)
I_D : Atmosfer dış yatay yüzeğe gelen	T_c : Çevre sıcaklığı ($^{\circ}C$)
I_d : Direkt ışınım bileşeni (W/m^2 gün)	I_{Te} : Eğimli panel yüzeyine gelen ışınım
I_{gs} : Güneş sabiti (W/m^2 gün)	V : Gerilim (V)
I_{KY} : Karanlık devre akımı (A)	V_m : Motorun çalışma gerilimi (V)

EK 1. Optimizasyon İçin Seçilen Sistem Bileşenlerin Teknik Özellikleri

PV Panel (AP-50)

Nominal Gücü*	50	W
Açık devre gerilimi*	21.5	V
Maksimum nokta da panel gerilim çıktısı*	16.7	V
Kısa devre akımı*	3.3	A
Maksimum nokta da panel akım çıktısı*	3.0	A
Panel verimi*	8.83	%
Panel boyutları	858x660	mm x mm

* Standart test koşullarında verilen değerler

DC Motor (Fırçasız)

Nominal gücü	2983	W
Nominal gerilimi	115	V
Nominal akımı	32	A
Motor armatür direnci	0.17	Ω
Nominal verimi	81	%

Pompa (santrifüj)

Pompa kanatçık sayısı (z)	5	-
Kanatçık giriş açısı (β_1)	50	Derece
Kanatçık çıkış açısı (β_2)	40	Derece
Pompa çarkı giriş çapı (R_1)	0.032	m
Pompa çarkı çıkış çapı (R_2)	0.088	m
Kanatçığın giriş yüksekliği (b_1)	0.012	m
Kanatçığın çıkış yüksekliği (b_2)	0.02	m